2001 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

지진하중을 받는 구조물의 준정적 최적설계

Quasi-Static Structural Optimization under the Seismic Loads

최우석, 이규만, 김태완

한국원자력연구소
대전광역시 유성우체국 사서함 105

요 약

본 연구는 지진하중이 작용하는 일체형원자로 SMART 의 최적화를 수행하기 위한 예비단계로서 동하중이 작용하는 탄성 구조물의 준정적 최적설계기법에 대해 다루고 있다. 임의의 시간에 동하중에 의해 발생하는 변위장과 동일한 변위장을 유발하는 정하중을 등가정하중이라 정의한다. 동하중 작용시 구조물의 다양한 상태를 표현하기 위해 각각의 모든 시간단계에서 계산된 여러 개의 등가정하중이 사용된다. 다수 개의 등가정하중은 임의의 시간에 발생할지도 모르는 위험상태를 모두 포함할 수 있다. 동하중의 연속적인 특성을 여러 개의 정하중으로 모사하였다. 계산된 등가정하중 집합은 최적화시 다중하중조건으로 사용된다. 설계주기는 해석영역과 설계영역의 순환과정으로 정의된다. 설계주기는 수렴할 때까지 반복된다. 해석영역은 설계영역에 필요한 하중조건을 제공하고 설계영역은 다음 설계주기의 해석영역에서 검증되어야 할 새로운 설계를 계산해 낸다. 제안한 방법을 통해 동하중하에서의 구조최적화가 가능하였다. 몇 가지 예제를 통해 제안한 방법의 타당성을 검증하였다.

Abstract

For preliminaries to optimization of SMART under the seismic loads, a quasi-static structural optimization for elastic structures under dynamic loads is presented. An equivalent static load (ESL) set is defined as a static load set, which generates the same displacement field as that from a dynamic load at a certain time. Multiple ESL sets calculated at all the time intervals are employed to represent the various states of the structure under the dynamic load. They can cover all the critical states that might happen at arbitrary times. The continuous characteristics of a dynamic load are considered by multiple static load sets. The calculated sets of ESLs are utilized as a multiple loading condition in the optimization process. A design cycle is defined as a circulated process between an analysis domain and a design domain. The analysis domain gives the loading condition needed in the design domain. The design domain gives a new updated design to be verified by the analysis domain in the next design cycle. The design cycles are iterated until the design converges. Structural optimization with dynamic loads is tangible by the proposed method. Standard example problems are solved to verify the validity of the method.

1. 서 론

세계적으로 원자력 에너지의 평화적 활용범위를 전력생산 이외의 분야로 넓히기 위한 노력이 활발하게 이루어지고 있으며 이와 관련하여 중소형 신형원자로의 개발에 대한 관심이 높아지고 있는 실정이다. 한국원자력연구소(KAERI)는 원자로 기술의 고도화 및 첨단화를 통한 향후 원자력 에너지 활용의 다변화에 대비한 시장의 기술력 선점을 목표로 다목적 활용을 위한 일체형원자로 SMART(System-integrated Modular Advanced ReacTor)를 개발하고 있다.[1] 이러한 원자로 개발을 위한 단계의 하나로 원자로집합체(reactor vessel assembly)의 동적해석을 수행하여야 한다.[2] 원자로집합체에 작용하는 동적하중으로는 지진, 태풍과 같은 자연 재해에 의해 발생하는 하중, 배관의 파단에 따른 하중, 그리고 핵증기공급계통(NSSS)을 구성하는 부품이나 기기의 낙하 혹은 비산에 의해 발생하는 충격하중 등을 고려할 수 있다. 동적하중에 대한 설계기준을 만족하기 위해서는 동적하중을 유발시키는 가상사고(postulated events)를 설정하고 이에 따른 설계하중을 정의하여야 한다. 일반적으로 핵증기공급계통을 구성하는 주요기기의 설계과정에서 가장 중요한 가상적 동적사고는 지진이 발생하는 경우이다. 지진으로 인하여 발생하는 동적하중은 핵증기공급계통을 구성하는 주요기기의 하중조합과 운전조건의 결정에 가장 큰 영향을 미치는 인자이다. 지진으로 인한 동적하중을 해석하기 위해서는 입력으로 사용될 인공지진에 대한 시간이력(time history)을 작성하여야 한다. 입력지진은 핵증기공급계통이 건설될 위치에 대한 지질학적 정보를 기준으로 하여 통계적인 정보를 포함하여야 하며, 핵증기공급계통을 설계하기 위한 기준을 만족할 수 있도록 작성되어야 한다. 본 연구에서는 이러한 지진하중을 받는 원자로의 최적화를 수행하기 위한 예비단계로서 동하중이 작용하는 구조물의 준정적 최적화기법을 제안하고자 한다.

구조최적화기법은 작용하중의 성격에 따라 크게 두 가지 분야로 나누어진다. 정적 최적화 분야와 동적반응 최적화 분야가 그것이다. 구조물에 작용하는 실제 하중은 모두 동하중이다. 동하중을 그대로 처리하는 동적최적화분야의 경우 여러가지 연구들이 진행되어 왔다. 동적해석시 사용되는 과도응답해석의 경우 계산량이 많고, 최적화시 민감도 해석을 수행하는데 어려움이 따른다. 이러한 이유로 동적반응최적화 방법을 적용할 때 주로 적은 자유도를 가지는 구조물에 국한되어왔다. 시간종속구속조건의 처리 등으로 인해 자유도가 큰 대형구조물의 경우 동적반응최적화 방법을 사용하는 것은 거의 불가능하다. 한편 정적반응 최적화 기법은 비교적 많은 연구에 의해 잘 정리되어 있는 상태이고 큰 구조물에도 많이 적용되어 왔다. 따라서 동적인 하중이 구조물에 가해졌을 때의 구조최적설계를 위해 경험적으로 얻은 동적계수를 동하중의 최대값에 곱하여 적당한 정하중을 얻은 후 그 힘을 이용하여 응력해석이나 정적최적설계를 수행하는 방법이 사용되어 왔다.[3] 그러나 동적계수는 타당성 문제가 제기되며 동적계수를 곱하여 얻은 정하중을 동하중이 가해지는 절점에 작용시킴으로써 실제 동하중을 받을 때의 상태를 제대로 표현할 수 있는지도 의문의 여지가 많다. 따라서 이로 인한 설계상의 신뢰성(reliability) 문제가 야기된다. 이를 극복하기 위하여 동적반응최적화 문제를 다수 개의 등가정하중을 이용하여 다중하중조건을 이용한 정하중하의 최적화문제로 바꾸어 시도하려는 연구가 진행되었다.[4,5] 이 방법은 공학적 관점에서 상당히 우수한 해를 제공하고 기존의 정하중을 이용한 설계의 단점을 지적하였다. 그러나 변환방법의 기준에 따라 서로 다른 등가정하중이 계산된다는 점과 하중작용절점의 선택, 설계변수에 대한 등가정하중의 민감도 계산 등의 어려운 점이 있었다. 이러한 단점을 극복하기 위하여 동하중을 등가정하중으로 변환할 때 모든 시간단계에 대하여 모든 절점에 작용하는 다수 개의 등가정하중을 구하는 방법을 제안하였다.[6] 지진하중이 작용하는 원자로 최적화의 예비단계로서 제안한 방법을 적용하였다. 몇 가지 예제를 풀어 구해진 최적해가 원래의 동하중에 대해서 제한조건을 만족함을 보임으로써 제안한 준정적 구조최적화 방법의 타당성을 검증하였다. 본 연구의 해석영역에서는 ANSYS 가 사용되었고 설계영역에서는 GENESIS 가 사용되었다.

2. 등가정하중의 산출

시간에 따라 그 크기가 변화하는 실제적인 하중을 동하중이라 하고 시간에 관계없이 일정한 크기를 가지는 이상적인 하중을 정하중이라 한다. 동하중이 구조물에 작용할 때 구조물은 진동하는데 이는 정하중으로는 표현할 수 없다. 각각의 하중들의 특징이 다르기 때문이다. 따라서 동하중에 의한 효과와 동일한 효과를 구조물에 줄 수 있는 하나의 정하중은 존재하지 않는다. 동하중을 등가의 정하중으로 변환할 때에는 어떤 기준이 존재해야 한다. 제안하는 방법은 다음과 같은 기준을 선정하였다.

"동하중에 의해 임의의 시간에 발생하는 구조물의 상태와 동일한 상태를 표현할 수 있는 정하중"

위의 기준을 만족하는 정하중은 다음과 같이 유도된다. 유한요소법을 이용한 진동이론에 따르면 구조물의 동적 거동은 다음과 같은 미분방정식으로 표현할 수 있다.

$$\mathbf{M}(\mathbf{b})\ddot{\mathbf{d}}(t)+\mathbf{K}(\mathbf{b})\mathbf{d}(t)=\mathbf{f}\,(t)=\{0\cdots0\ \mathrm{f}_{\mathrm{i}}\cdots\mathrm{f}_{\mathrm{i}+l-1}\,0\cdots0\}^{\mathrm{T}} \quad (1)$$

여기서 **M** 은 질량행렬, **d** 는 동하중에 의한 변위벡터, **K** 는 강성행렬, **b** 는 설계변수, **f** 는 동하중 벡터, l 은 동하중 벡터의 영이 아닌 요소의 숫자이다. 한편 정적해석의 유한요소방정식은 다음과 같다.

$$\mathbf{K}(\mathbf{b})\mathbf{x} = \mathbf{s} \quad (2)$$

여기서 **x** 는 정적 변위이고 **s** 는 정적하중을 의미한다. 위의 식들을 사용하면 동하중하의 과도응답 계산시 임의의 시간 t_a 에 발생하는 변위장과 동일한 변위장을 발생시키는 등가정하중 **s** 는 다음과 같은 식으로 계산할 수 있다.

$$\mathbf{s} = \mathbf{K}\mathbf{d}(t_a) \quad (3)$$

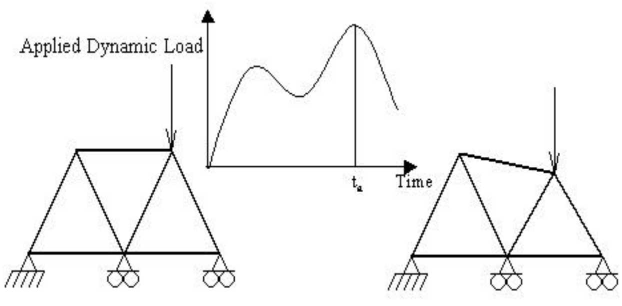

Fig. 1 The structure under dynamic load at a certain time

Fig. 1 에서 왼쪽의 7 부재 트러스에 임의의 동하중이 작용한다. 임의의 시간 t_a에 구조물의 형상은 오른쪽의 트러스 모양으로 변형한다고 하자. 임의의 시간의 동적변위장 $\mathbf{d}(t_a)$는 식 (1)에서 계산된다. 이를 식 (2)의 **x** 에 대입하면 식 (3)을 얻을 수 있다. 식 (3)에 의해 계산된 정하중 **s** 는 동하중에 의해 임의의 시간에 구조물에 발생하는 변위장과 동일한 변위장을 유발하는 등가정하중이

다. 일반적으로 구조해석이나 이에 기초한 설계시 유한요소 모델을 생성한다. 모델이 완성되면 식 (3)의 전체강성행렬을 얻을 수 있다. 따라서 등가정하중은 이미 알고 있는 전체강성행렬과 임의의 시간의 동적변위벡터의 단순한 곱셈에 의하여 계산된다. 식 (3)은 당연한 듯 보이고 과도응답해석이 필요하므로 계산시간의 효율적인 측면에서 비실용적으로 비추어 질 수 있으나 임의의 시간에 동하중에 대한 등가정하중이 해석적으로 존재한다는 사실을 보여준다.

일반적으로 하중을 정의하는 문제에서 작용지점의 개수 및 위치는 알고 있다고 가정한다.[9] 그 이유는 실제 반응치는 모든 자유도에 대하여 연속적인 벡터형태로 표현되지만 우리가 얻을 수 있는 반응치는 실험 등을 통하여 몇 개의 절점에서만 정의되기 때문이다. 몇 개의 절점에서의 반응치를 만족시키는 하중은 무수히 많이 존재하며 이러한 부정정의 문제를 고유해가 존재하도록 하기 위해서는 필연적으로 하중작용지점에 대한 가정이 필요하게 된다.
그러나 가정을 어떻게 설정하느냐에 의하여 계산된 정하중의 유효성이 결정될 수 있다는 사실은 바람직하지 못하다. 반면에 제안한 방법은 행렬의 곱셈에 의하여 유일한 하중을 계산한다. 하중작용절점의 위치 및 개수에 관한 가정은 필요 없다. 이러한 등가정하중은 모든 자유도에 작용하며 동하중에 의해 임의의 시간에 발생하는 변위장과 동일한 변위장을 생성하는 하중이다. 식 (3)은 유한요소 지배방정식을 그대로 이용하는 것이고 식 (1)을 사용하면 식 (3)은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\mathbf{s} = \mathbf{f}(t) - \mathbf{M}(\mathbf{b})\ddot{\mathbf{d}}(t) \tag{4}$$

식 (3)과 식 (4)를 비교해 보면 등가정하중은 동하중하에서는 작용하는 하중에 질량과 가속도의 곱으로 표현되어 있는 관성효과에 관한 항이 더해지는 것을 알 수 있다. 만약 구조물의 설계가 변경되면 강성행렬 및 질량행렬이 변한다. 이 때 등가정하중은 변경된 질량행렬에 의한 관성효과가 작용하중 f(t)에 더해져서 얻어진다. 이는 이전의 동하중과는 다른 새로운 등가정하중이며, 등가정하중이 설계변수의 함수임을 의미한다. 또한 식 (4)에서도 알 수 있듯이 등가정하중은 관성효과가 고려된 하중이므로 동하중과 다른 경향으로 나올 수 있다.

3. 최적설계로의 적용

모든 실제 구조물에 작용하는 하중은 동하중이므로 구조최적설계시에도 이러한 동하중을 그대로 처리하는 동적반응최적화 방법과 이를 준정적인 방법으로 변환하여 시도하는 연구가 진행되어 왔다. 두 가지 방법은 각각 다음과 같은 문제점을 가지고 있다. 예를 들어 항공기의 날개를 설계한다고 할 때 과도응답해석에 바탕을 둔 동적반응최적화 방법은 많은 설계변수와 제한조건, 시간종속구속조건의 처리 등으로 인해 어려움이 뒤따른다. 준정적인 최적화의 경우 공기역학에 의한 해석을 통해 양력, 항력 등의 하중조건을 구하고 이를 설계하중으로 적용하여 비행기 날개의 형상 등을 결정할 수 있다. 그러나 비행기 날개의 형상이 변경되면 그에 의해 날개에 작용하는 여러 가지 반력들이 달라지게 된다. 따라서 설계하중에 대한 한번의 정적인 최적화는 적절한 설계값을 줄 수 없다. 따라서 준정적인 최적화의 경우 반복수행이 고려되어야만 한다. 따라서 새로운 하중조건을 구하기 위해서는 다시 공기역학에 근거한 해석이 필요하고 이렇게 구해진 하중조건은 다시 설계에 사용된다. 이러한 과정은 반복적으로 진행된다. 이를 도식적으로 표현하면 Fig. 2 와 같다.

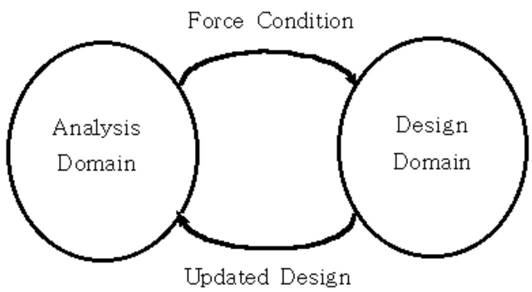

Fig. 2 The analysis domain and the design domain

Fig. 2 에서 준정적인 최적화의 과정은 해석영역(analysis domain)과 설계영역(design domain)으로 나누어진다. 해석영역에서의 결과를 바탕으로 설계영역에서 사용될 하중조건이 계산되고 설계영역에서의 결과값으로 계산된 설계에 대하여 다시 해석을 수행하여 제한조건의 만족을 검증한다. 이러한 일련의 과정을 설계주기(design cycle)라고 하며 이는 설계값이 수렴할 때까지 반복적으로 수행되어야 한다.

동하중하에서 나타나는 구조물의 동적특성(속도, 가속도, 진동)은 정하중으로 모사(simulation)할 수 없다. 그러나 동적특성이 중요하게 취급되는 강체진동계를 제외한 일반적인 구조물에서는 동적특성보다는 응력이나 피로 등에 의한 파손 및 파괴특성이 중요하게 여겨진다. 순수한 시간영역에서의 과도응답해석보다는 조화응답해석 또는 모드해석 등이 구조물의 동적 특성을 반영하는 방법으로 사용되어왔고 설계할 때는 정하중을 이용하여 구조물의 파손조건에 초점을 맞추어 진행되어 왔다. 그러나 하나의 설계정하중만을 사용하여 동하중을 받는 구조물의 파손조건을 계산하는 것은 충분하지 않다. 동하중을 받는 구조물은 진동하기 때문에 동일한 부재라도 시간에 따라서 인장과 압축이 바뀌어 작용할 수 있지만 하나의 정하중은 동일한 부재에 한가지의 응력 상태만을 가져오기 때문이다. 따라서 특정한 시간들에서 동하중의 효과를 표현할 수 있는 다수 개의 정하중을 만들어 이를 최적설계시 적용한 연구가 발표되었다.[5] 다수 개의 정하중으로 동하중의 효과를 최대한 표현하겠다는 의도였다. 몇 가지 문제점으로 지적할 수 있는 것들은 다음과 같다. 모든 자유도에 대하여 모든 위험시간[7]을 계산한 것이 아니라 중요한 자유도, 예를 들면, 다른 자유도에 비해 최대변위의 크기가 큰 자유도 등에 대해서만 위험시간을 계산하였다. 따라서 위험시간을 구하기 위해 어떤 자유도와, 얼마나 많은 자유도를 기준으로 선택할 것인가 하는 문제 등이 대두되었다. 또한 매 설계주기마다 위험시간이 달라지므로 이를 따라가야 한다는 것과 등가정하중의 작용절점의 선택, 설계변수의 함수인 등가정하중의 민감도 계산 문제 등이 있었다. 또한 등가정하중에 대하여 설계영역에서 설계치가 계산되면 해석영역에서 다시 과도응답해석을 수행한다. 변경된 설계에 대하여는 초기설계에서와 동일한 시간이 위험시간이 되지 않는다. 다른 시간에 더 큰 최대변위가 발생할 수도 있다. 따라서 매 반복수행마다 이를 따라가야 하는 어려움이 있다. 다른 자유도가 추가되면 더 많은 위험시간을 고려해야 한다. 이는 문제를 더 복잡하게 만들 수 있고 수렴특성에 좋지 않은 영향을 미칠 수 있다.

본 연구에서 제안한 방법은 모든 해석시간에 대하여 등가정하중을 계산하기 때문에 위험시간을 구할 필요도 없고 매 반복수행마다 위험시간을 따라가야 할 필요도 없다. 모든 시간단계에 대하여 등가정하중을 구하면 그 개수가 상당하지만 다중하중조건으로 적용되기 때문에 큰 어려움은 없다. 최적화 과정에서 다중하중조건을 고려하는 방법은 위배된 각각의 제한조건들 중에서 가장 위험한 것들에 대하여만 민감도 해석을 수행한다. 따라서 계산시간은 작고 효율적이다. 또 최대변위가 발생하는 시간과 인접한 시간에서의 변위장을 표현하는 등가정하중도 하중조건으로 작용하기 때문에 최대변위발생시간을 따라가며 최적화하는 것 보다 좋은 결과를 준다. 위험시간을 매

자유도에 대하여 구하는 것은 많은 계산량을 필요로 한다. 위험시간을 계산하지 않고 매 시간단계마다 등가정하중을 구하는 것이 오히려 계산량이 적고 또 예상치 못한 위험시간에 대해서도 방어할 수 있는 장점이 있다. 이러한 장점들은 수렴특성을 향상시킨다. 본 연구에서는 해석시간 전체에 대하여 모든 자유도에 작용하는 등가정하중을 구하여 다중하중조건으로 적용하여 Fig. 1 의 해석영역과 설계영역을 왕래하며 반복수행을 통해 수렴시키는 최적화 기법을 제안한다. Fig. 1 에서 해석영역과 설계영역으로 이루어지는 한 번의 설계주기에 대한 일련의 과정을 도식화하면 Fig. 3 와 같이 표현될 수 있다. 이를 단계별로 나타내면 다음과 같다.

STEP 1. 구조물의 초기 설계값에 대한 과도응답해석의 수행(해석영역)
STEP 2. 매 시간단계에 대한 변위장의 계산
STEP 3. 매 시간단계에 대한 등가정하중의 계산 (식 (3)을 이용하여 매 시간단계에서 계산된 변위장을 전체 강성행렬과 곱하여 매 시간단계에서 엄밀한 등가정하중을 계산한다.)
STEP 4. 다수 개의 등가정하중을 다중하중조건으로 적용한 최적설계(설계영역)
STEP 5. 개선된 설계값에 대한 과도응답해석의 수행(해석영역)
STEP 6. 수렴할 때까지 STEP 2 ~ STEP 5 의 과정을 반복수행

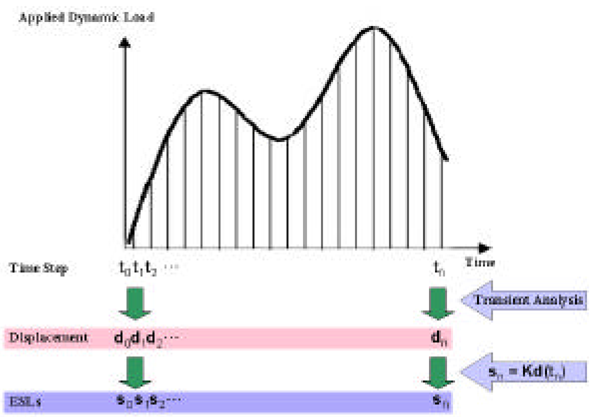

Fig. 3 A diagram for the proposed quasi-static optimization technique

제안하는 최적화 방법에 대한 설계영역에서의 정식화는 다음과 같다.

$$
\begin{array}{ll}
\text{Find} & \text{Design Variables} \\
\text{Minimize} & \mathrm{F}(\mathbf{b}) \\
\text{subject to} & \mathbf{K}(\mathbf{b})\mathbf{x} = \mathbf{s_i}(\mathbf{b}) \\
 & (\mathrm{i} = 1, \cdots, \text{No.of time steps}) \\
 & \Phi(\mathbf{b}, \mathbf{x})_{\mathbf{j}} \le 0 \\
 & (\mathrm{j} = 1, \cdots, \text{No.of constraints})
\end{array}
\tag{5}
$$

식 (5)에서 제한조건의 유한요소 지배방정식은 매 시간단계마다 계산된 등가정하중의 집합이다. 최적화시 수렴조건은 다음과 같이 정의된다.

$$
e_i = \frac{\|b_i - b_{i-1}\|}{\|b_i\|} \le e_0 \quad (i = 1, 2, \cdots, \text{No. of desin cycles}) \tag{6}
$$

여기서 b_i 은 i 번째 설계주기의 설계변수이고 b_{i-1} 는 i-1 번째 설계주기의 설계변수이다. 개선된 설계값과 이전 설계값의 차이가 허용오차 내에 있으면 수렴한 것으로 한다. 이전 설계값과의 차이가 없다는 것은 마지막 설계주기의 설계영역에서 초기값과 개선해의 값이 동일함을 의미한다. 개선해에 대하여 구조물에 작용하는 동하중에 대한 등가정하중을 계산하면 이전설계주기에서와 동일하게 계산되고 따라서 더 이상의 설계값의 변화가 없음을 의미한다.

동하중을 받는 구조물의 해석 및 설계에 정하중을 이용하기 위해서는 고려해야 할 두 가지가 있다. 첫번째는 동하중에 대한 정하중의 산출시 타당성 문제이고 두 번째는 적절한 정하중이 산출되었다고 하더라도 이를 어떻게 적용하는가 하는 문제이다. 요약하면 첫번째 문제는 제안한 등가정하중을 이용하여 해결하고 두번째 문제는 다중하중조건과 설계주기를 반복수행하는 최적화 과정을 통하여 해결하는 것이다.

4. 수치 최적화 예제

제안한 최적설계방법을 평가하기 위하여 참고문헌 [8]에 나와있는 예제를 풀어 그 결과를 비교하였다. 선택한 예제는 지진하중을 받는 프레임 예제이다. 해석시 굽힘변형에 비하여 축방향변형은 무시하기로 가정한다. 한 개의 설계변수 즉, 관성모멘트 I 에 의해 단면적이 결정된다. 실험식에 의하여 굽힘 모듈러스(bending modulus), S와 면적, A 는 I 와 연관되어 있다고 가정한다. 예제에서 사용한 관계식은 다음과 같다.

$$S = (60.6I + 84{,}000)^{1/2} - 290,\ \ 0 \le I \le 9{,}000$$
$$S = \frac{I - 8{,}056.3}{1.876},\ \ 9{,}000 \le I \le 20{,}300 \tag{7}$$

$$A = 0.465(I)^{1/2},\ \ 0 \le I \le 9{,}000$$
$$A = \frac{I + 2{,}300}{256},\ \ 9{,}000 \le I \le 20{,}300 \tag{8}$$

여기서 I 의 단위는 in^4, S 는 in^3, 그리고 A 는 in^2 이다.
반여현파 모양의 수평방향의 지면운동이 가해지는 하중함수로 사용된다. 이러한 하중은 식 (9)로 정의된다.

$$u_g = 0,\ t < 0;\ u_g(t) = u_{g0} \sin pt,\ 0 \le t \le \frac{\pi}{p};\ u_g(t) = 0,\ t > \frac{\pi}{p} \tag{9}$$

여기서 $u_g(t)$는 지면변위, u_{g0} 는 지면변위의 진폭, p 는 여현파함수의 진동수이다. 각각의 값은 p=30 rad/sec; u_{g0}=1 in. (25.4 mm)이다. 프레임을 구성하는 재료는 다음과 같은 물성치를 가진다. 탄성계수, E=30×10^6 psi (20.7×10^6 N/cm^2); 비중량, γ=0.28 pci (0.0077 kg/cm^3). 동일한 분포하중 10 lb/in. (17.5 N/cm) 가 수평방향부재에 작용한다. 부과된 중량은 프레임의 일부분은 아니다. 결과적으로 설계변수에 영향을 받지 않는다.

4.1 One-Story One-Bay Frame

Fig. 4와 같은 portal frame 에 전술한 반주기 여현파의 지진하중과 변위 및 응력제한조건이 작용

한다. 설계변수는 각각의 부재당 한 개씩 모두 3 개이다. 그러나 프레임의 대칭성을 고려하여 2 개의 수직부재는 동일하다고 가정하여 독립된 설계변수는 2 개이다. 독립설계변수는 부재 1, 2에 대하여 d_1, 부재 3 에 대하여 d_2 로 선택하였다. 해석시간은 0 ~ 0.315 초까지이며 이를 160 개의 시간 단계로 나누었다. 각각에 대하여 모든 자유도에 작용하는 160 개의 등가정하중을 산출하여 다중하중조건으로 적용하고 설계주기의 반복과정을 통하여 최적화를 진행하였다. 최적화 문제의 정식화는 식 (10)과 같다.

$$\begin{aligned} &\text{Minimize} && \text{weight} \\ &\text{subejct to} && |s_{max}| < 30{,}000\ \text{psi}(20{,}700\ \text{N/cm}^2) \\ &&& |u_{max}| < 3\text{inch (76 mm)} \\ &&& w_1 > 60\ \text{rad/sec.} \\ &&& 290\ \text{in}^4\ (12{,}070\ \text{cm}^2) < I < 20{,}300\ \text{in}^4 (844{,}886\ \text{cm}^2) \end{aligned} \tag{10}$$

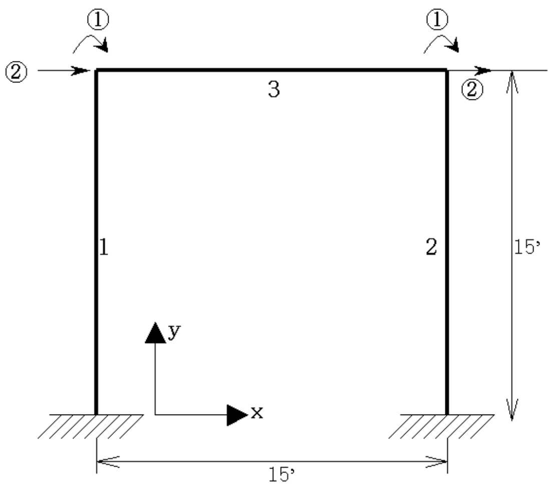

Fig. 4 The one-story one-bay frame

제안한 방법을 이용한 최적화의 결과와 동적반응최적화 방법을 사용한 참고문헌 [8]의 결과가 함께 Table 1에 나타나 있다. Table 1에서 응력 및 변위값은 초기치 또는 최적해를 가지고 원래의 동하중에 대한 과도응답해석을 수행하였을 때의 최대값을 의미한다. 일관성을 기하기 위해 제안한 방법을 이용한 최적화시 쓰여진 프로그램과 동일한 해석프로그램으로 참고문헌 [8]의 최적해에 대하여 과도응답해석을 수행하였다. 그 결과는 참고문헌 [8]과 조금 다르다. Table 1에서 보면 최적해에 대한 과도응답해석 결과 최대응력값이 허용응력값에 가까워서 최적화가 잘 수행되었음을 알 수 있다. 참고문헌 [8]의 경우는 허용응력값을 위배하여 아직 설계개선의 여지가 있음을 알 수 있다. 참고문헌에서 사용된 해석코드와 본 연구에서 사용된 해석코드가 서로 다르므로 2 개의 결과

Table 1 The initial values and the optimum results for the one-story one-bay frame (in^4, psi, in, Hz, lb)

	d_1	d_2	$\sigma_{1,max}$	$\sigma_{3,max}$	$\delta_{2,max}$	f_1	No. of design cycle	Weight
Initial value	290	290	44120	41861	1.27	9.97		1,197
Opt	424.3	413.3	29912	29903	0.76	11.71	3	1,442
Ref. [8]	489	330	22536	√31619	0.77	12.03	11	1.463

를 정량적으로 비교할 수는 없다. 적어도 제안한 방법에 의한 최적해가 원래의 동하중에 대한 제한조건을 만족시키는 적절한 설계이고 중량을 살펴보면 제안한 방법이 중량감소의 효과가 큰 좋은 결과임을 알 수 있다. 설계주기의 회수는 과도응답해석의 실행회수와 동일하기 때문에 수렴속도 및 계산량에 매우 중요한 영향을 준다. 참고문헌의 방법은 11 번의 반복과정을 통하여 수렴한 반면에 제안한 방법은 3 회의 설계주기를 통하여 수렴하여 계산량을 많이 줄일 수 있었다. 그러나 제안한 방법은 계산된 등가정하중 하에서 최적설계를 수행하므로 동적반응최적화 방법과 비교할 때 이는 부가적인 노력이 필요한 것이라 할 수 있다. 동적반응최적화 방법이 쿤-터커 조건(Kuhn-Tucker conditions)을 만족하는 최적값을 주는 반면에 제안한 방법은 정적으로 근사화하여 최적화하는 방법이므로 쿤-터거 조건의 만족을 보장할 수 없다. 해석하고자 하는 구조물의 자유도가 커지면 과도응답해석 및 시간종속 구속조건의 처리 등의 어려움으로 인하여 동적반응최적화 방법을 그대로 적용할 수 없게 된다. 반면에 제안된 방법은 상대적으로 적은 노력으로 동적반응최적화 기법을 적용한 것과 유사한 결과를 얻을 수 있어 공학적으로 매우 유용하다. 본 예제를 통하여 엄밀한 등가정하중을 이용한 최적화 방법이 동하중이 작용하는 구조물의 최적화 방법으로 안정적인 해를 제공함을 알 수 있다.

4.2 Two-Story One-Bay Frame

4.1 절에서와 같이 대칭조건을 고려하고 축방향 변형을 무시하여 독립설계변수의 개수와 자유도의 개수를 줄였다. 독립설계변수는 다음과 같다. 부재 1, 2는 d_1, 부재 3, 4는 d_2, 부재 5 는 d_3, 부재 6 은 d_4 이다. 제한조건은 부재 1, 3, 5, 6 에 대한 응력제한조건과 2, 4 번 자유도 방향으로의 변위, 그리고 고유진동수이다. 초기 설계값은 d_{0j}=1,500in^4 (62,430 cm^2), j=1, 2, 3, 4 이다. 해석시간은 0 ~ 0.315 초까지이며 이를 190 개의 시간단계로 나누었다. 각각에 대하여 모든 자유도에 작용하는 190 개의 등가정하중을 산출하여 다중하중조건으로 적용하고 설계주기의 반복과정을 통하여 최적화를 진행하였다. 최적화 문제의 정식화는 식 (11)와 같다.

$$\begin{aligned} &\text{Minimize} && \text{weight} \\ &\text{subejct to} && |s_{max}| < 30{,}000 \text{ psi}(20{,}700 \text{ N/cm}^2) \\ & && |u_{max}| < 3 \text{ inch } (76 \text{ mm}) \\ & && w_1 > 30 \text{ rad/sec.} \\ & && 290 \text{ in}^4 (12{,}070 \text{ cm}^2) < I < 20{,}300 \text{ in}^4 (844{,}886 \text{ cm}^2) \end{aligned} \tag{11}$$

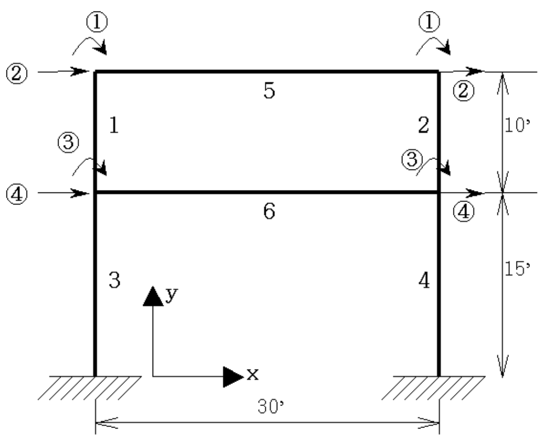

Fig. 5 The two-story one-bay frame

Table 2 The initial values and the optimum results for the 2-Story 1-bay frame (in^4, psi, in, Hz, lb)

	d_1	d_2	d_3	d_4	f_1	f_2	f_3	f_4	Weight
	$\sigma_{1,max}$	$\sigma_{2,max}$	$\sigma_{3,max}$	$\sigma_{4,max}$	$\sigma_{5,max}$	$\sigma_{6,max}$	$\delta_{2,max}$	$\delta_{4,max}$	Iteration
Initial value	1500	1500	1500	1500	7.58	30.82	97.09	140.02	6656
	28256	28256	34500	34500	29043	39602	2.01	1.26	
Opt	1356	2624	1376	4196	10.03	31.24	102.11	146.69	8327
	26920	26920	27241	27241	29000	29504	1.55	0.82	4
Ref. [8]	1719	8378	1334	533	10.67	41.85	114.8	186.40	8380
	24306	24306	7297	7297	$\sqrt{30665}$	$\sqrt{32598}$	1.31	0.62	20

최적화의 결과는 참고문헌 [8]의 결과와 함께 Table 2 에 나타나 있다. 응력 및 변위값은 동하중에 대한 과도응답해석을 수행하였을 때의 최대값을 의미한다. 제안한 방법의 최적화시 사용된 것과 동일한 프로그램으로 참고문헌 [8]의 최적해에 대한 과도응답해석을 수행한 결과는 앞의 예제에서와 마찬가지로 참고문헌과 다르다. Table 2 에서 보면 최적해에 대한 과도응답해석 결과 최대응력값이 허용응력값에 가까워서 최적화가 잘 수행되었음을 알 수 있다. 참고문헌 [8]의 경우는 설계개선의 여지가 있다. 참고문헌에서 사용된 해석코드와 본 연구에서 사용된 해석코드가 서로 다르므로 2 개의 결과를 정량적으로 비교할 수는 없다. 적어도 제안한 방법에 의한 최적해가 원래의 동하중에 대한 제한조건을 만족시키는 적절한 설계이고 중량을 살펴보면 제안한 방법이 중량 감소의 효과가 큰 좋은 결과임을 알 수 있다. 설계주기의 회수는 참고문헌의 경우 20 번의 반복과정을 통하여 수렴한 반면에 제안한 방법은 4 회의 설계주기를 통하여 수렴하였다.

5. 결 론

반여현파 지진하중을 받는 구조물에 제안한 준정적인 최적화 기법을 적용하였다. 주어진 동하중에 대하여 매 시간단계마다 등가정하중을 구하고 최적화시 이를 다중하중조건으로 적용하였다. 등가정하중은 임의의 시간에 동하중에 의해 구조물에 발생하는 모든 반응치장과 동일한 반응치장을 유발하는 정하중으로 정의되었다. 동하중에 의한 효과를 정하중으로 표현하기 위해 매 시간단계에서 구해진 등가정하중 집합을 모두 고려하는 방법을 제안하였고 이는 다중하중조건을 적용함으로써 가능하였다. 설계가 변경되면 동하중에 대한 반응치도 달라지고 등가정하중도 달라지게 된다. 따라서 해석영역과 설계영역을 정의하고 이 두 영역 사이를 오가는 과정을 설계주기로 정의하였다. 제안한 준정적인 최적화 기법은 설계주기의 반복과정을 통하여 이루어졌다. 수렴조건은 이전 설계주기의 설계값과 현재 설계주기의 설계값과의 차이가 허용오차 범위 내에 있을 때로 정의하였다. 모든 경우에 대하여 수학적으로 수렴성을 보장할 수 없지만 동하중이 작용하는 큰 구조물의 동적반응최적화가 거의 불가능한 현실을 감안할 때 공학적인 최적화 방법으로 적용가능성을 보였다. 특히 본 연구의 제한된 예제의 범위내에서는 동하중을 받는 구조물에 대한 최적화 방법으로 좋은 특성을 보여주었다.

후 기

본 연구는 과학기술부의 원자력 연구개발사업의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

(1) **박근배**, **최순**, **김강수**, **김태완**, **정경훈**, **이규만**, 1999, "**일체형원자로 기계설계기술개발**," KAERI/RR-11888/98, **한국원자력연구소**

(2) ASME Boiler and Pressure Vessel Code Section III, 1998, Dynamic Analysis Methods, Appendix N, The American Society of Mechanical Engineers.

(3) Haftka R.T. and Gürdal Z., 1991, *Elements of Structural Optimization*, The Netherlands: Kluwer Academic Publishers.

(4) Choi, W.S. and Park, G.J., 1999, "Transformation of Dynamic Loads into Equivalent Static Loads Based on Modal Analysis," *Int. J. for Num. Meth. in Engng*., Vol. 46, pp.29~43.

(5) B.S. Kang, W.S. Choi, and G.J. Park, (2001), "Structural Optimization Under Equivalent Static Loads Transformed fromDynamic Loads Based on Displacement," Computers and Structures, November, Vol. 79, No. 2, pp.145-154.

(6) **최우석**, **박경진**, 2000, "**매 시간단계의 등가정하중을 다중하중조건으로 이용한 준정적 구조최적화 방법**," **대한기계학회논문집** A, **제** 24 **권**, **제** 10 **호**, pp. 2568-2580.

(7) Grandhi, R.V., Haftka, R.T., and Watson, L.T., 1986, "Design-Oriented Identification of Critical Times in Transient Response," *AIAA Journal*, Vol. 24, No. 4, pp. 649~656.

(8) Cassis, J.H. and Schmit, L.A., 1976, "Optimum Structural Design with Dynamic Constraints," Journal of the Structural Division.

(9) Möller, P.W., 1999, "Load Identification Through Structural Modification," *ASME Journal of Applied Mechanics*, Vol. 66, pp. 236~241.